Zool. Anz. **231** (1993) 3/4, S. 83—98
Gustav Fischer Verlag Jena

Auswirkungen von Düngergaben auf die Mesofauna, insbesondere Collembolenfauna, verschiedener Waldstandorte im Böhmerwald

Effects of Fertilization on the Mesofauna, especially Collembolan, in different Forest Habitats in the Bohemian Woods

Von HUBERT KOPESZKI

Institut für Zoologie der Universität Wien (Österreich)

Mit 1 Abbildung und 4 Tabellen (Angenommen: 17. Februar 1993)

Key words: soil mesofauna, Collembola, N-fertilization, soil diagnosis, bioindication

Abstract

Fertilization experiments done in forest management in pollutant burdened and nutrient-poor spruce habitats cause multiple ecological changes. Fertilization affects population densities and the community structure of soil coenoses markedly so that sensitive groups or species of mites and collembolans (Isotomidae, e.g. *Isotomiella minor*) can be used as bioindicators for soil condition changes. While pure N-fertilizers decrease abundance, species-composition and diversity, well chosen "slow release" fertilizers (e.g. Biomag, Biomag with Bactosol) can positively influence soil coenoses and their turnover activities.

Einleitung

Im österreichischen Teil des Böhmerwaldes treten seit vielen Jahren deutliche Symptome neuartiger Waldschäden auf. Es handelt sich dabei um Kronenverlichtungen, Nadelvergilbungen und Absterben von Baumgruppen. Diese Schadmerkmale werden als Ausdruck von Ernährungsstörungen interpretiert (ZECH, POPP 1983, ZÖTTL, HÜTTL 1985). Untersuchungen im Rahmen der FIW (Forschungsinitiative gegen das Waldsterben in Österreich) zeigen zudem, daß es zu erheblichen Schadstoffdepositionen im Böhmerwald kommt, die sich angesichts der primär nährstoffarmen, z. T. durch historische Landnutzung zusätzlich degradierten Böden, negativ auf die Mineralstoffernährung der Waldbestände auswirken (GLATZEL et al. 1988, KAZDA 1989, KATZENSTEINER, GLATZEL, KAZDA 1992, KATZENSTEINER, GLATZEL, KAZDA, STERBA 1992). Die Nadelanalysen belegen, daß die Bäume zusätzlich zum Schadstoffstreß unter einem akuten Nährstoffmangel (Mg, Zn, Ca) leiden.

In Exaktversuchen wurden daher verschiedene Düngermengen und Düngerkombinationen in mehreren, unterschiedlichen Waldstandorten ausgebracht, um zu überprüfen, ob sich damit die Vitalität der Bestände verbessern läßt. Neben einer Reihe pflanzenphysiologischer, bodenchemischer und bodenmikrobiologischer Untersuchungen wurde auch eine bodenzoologische Begleituntersuchung durchgeführt, um festzustellen, welche Auswirkungen Düngergaben auf Populationsdichten und Gemeinschaftsstrukturen der Bodenzönosen haben.

Da die Bodenmesofauna entscheidend bei der Dekomposition anfallender organischer Substanzen mitwirkt (Beck 1989, Peterson, Luxton 1982, Santos, Whitford 1981, Crossley, Wittkamp 1966) und ein erheblicher Teil des Mineralsalzkreislaufes von ihr katalysiert wird (Anderson et al. 1983, Bååth et al. 1981, Herlitzius 1987, Huhta et al. 1991, Seastedt 1984, Setälä et al. 1988, 1991), ist es von großem Interesse, zu ermitteln, wie Bodentiere auf Düngergaben reagieren. Aus der Literatur ist hinlänglich bekannt, daß die Mesofauna bei Düngung durch Verbesserung der Nahrungsqualität und -quantität positiv beeinflußt werden kann, ihre Abundanz gesteigert und dadurch der Nährstoffkreislauf und Energiefluß angekurbelt wird (Abrahamsen, Thompson 1979, Amelsvoort, Usher 1989, Booth, Anderson 1979, Huhta 1967, 1969, Trojanowski, Baluk 1989, Usher 1985). Solche positiven Effekte auf die Boden(meso)fauna wären also für die genannten Waldsanierungsmaßnahmen von entscheidender Bedeutung, um so durch Beschleunigung der Dekomposition und Mineralisation und damit verbesserter Nährsalzbereitstellung die Baumernährung zu verbessern.

Ebenso bekannt ist aber auch, daß durch zu hohe Düngergaben negative Effekte für die Bodenmesofauna auftreten, was zu einer Verzögerung der Abbauraten führt und die Stabilität des Bodensytems verringert (Abrahamsen, Thompson 1979, Axelsson et al. 1983, Behan 1978, Lohm et al. 1977). Solche negativen „Begleit-Effekte“ treten erst in jüngerer Zeit durch die ungewollten Stickstoffimmissionen (aus Massentierhaltungen und Agrarflächendüngung) in vielen europäischen Waldökosystemen auf (Kaupenjohann 1990, Isermann 1990).

Den Bodentieren kommt somit auch eine Rolle als Bioindikatoren zu, wobei Bioindikation bedeutet, daß aus den verschiedenen Bedürfnissen und Reaktionscharakteristiken einzelner Zeigerarten auf ökologisch und produktionsbiologisch relevante Düngereffekte rückgeschlossen werden kann (Aescht, Foissner 1992, Dunger 1982, Funke 1986, 1987, Ghilarov 1978, 1980, Hågvar 1982, Kopeszki 1991, Schubert 1991).

Aus Abundanzzahlen und Populationsstrukturen und aus der Verteilung der Tiere im Boden kann weitgehend sowohl auf die natürliche Fruchtbarkeit des Bodens, wie vor allem auch auf anthropogen bedingte Bodenbelastungen (durch falsch gewählte Düngergaben und -kompositionen) geschlossen werden. Die Bodenmesofauna hat sich bereits bei einer ähnlich gelagerten Fragestellung im Rahmen der FIW als gut brauchbare und praktisch sinnvoll einsetzbare Meßeinheit für Boden-„Belastungen“ erwiesen (Kopeszki 1988, 1991, 1992b). Somit konnte sie auch bei der hier vorliegenden Studie wieder als Zeigergruppe Verwendung finden. Die weichhäutigen und schadstoffsensitiven Collembolen erfahren dabei besondere Berücksichtigung, weil durch Vorstudien gezeigt werden konnte, daß sie bei solchen Fragestellungen sogar als „aktive“ Bioindikatoren eingesetzt werden können (Kopeszki 1992a).

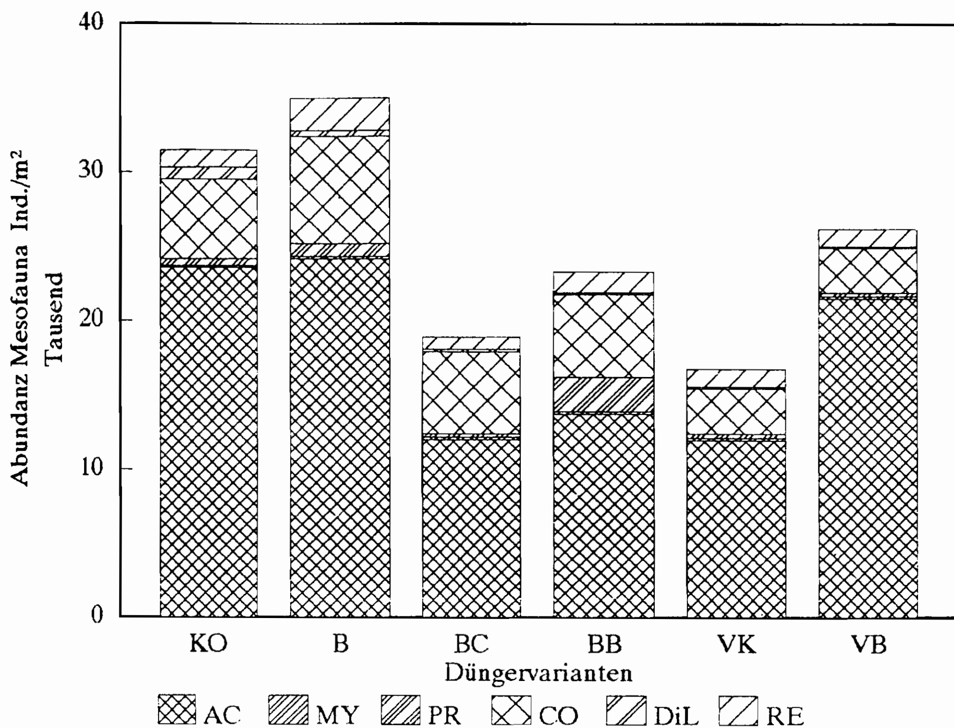


Abb. 1. Abundanz und Dominanz der Bodenmesofauna in Viehberg; Mittelwerte 1991/92 (AC.. Acari, MY.. Myriapoda, PR.. Protura, CO.. Collembola, DiL.. Diptera-Larven, RE.. restlicher Begleitfang, wie Nematoda, Oligochaeta, Colleoptera u. a. Insekten-Larven); Varianten: KO.. Kontrollfläche, B.. Biomag, BB.. Biomag mit Bactosol, VK.. Vollkorn, VB.. Vollkorn mit Biomag.

Erste Arbeitsziele waren die Ermittlung der Istzustände der Bodenmesofaunen (Ausgangssituation) verschiedener Waldstandorte im Böhmerwald; dann die Feststellung der Reaktionscharakteristika nach Düngerapplikation im Rahmen der Waldsanierungsversuche; schließlich die ökologische Risikoabschätzung der Düngungsmaßnahmen.

Standort, Methoden und Untersuchungsdauer

Die Untersuchungsflächen liegen im österreichischen Teil des Böhmerwaldes in einer Seehöhe von ca. 1000 m. Für eine langfristige interdisziplinäre Untersuchungsreihe wurden Proben aus den Fichtenbeständen in Schöneben (Bärenstein mit rund 80jährigem Bestand auf pseudovergleyten Semipodsolen; Pflegerwiese mit 40jährigem Bestand auf pseudovergleyten Braunerden, Trautwald mit 80jährigem Bestand auf tiefgründigen Semipodsolen mit bis 10 cm mächtiger Rohhumusschicht) genommen. Bärenstein und Pflegerwiese weisen durch landwirtschaftliche Zwischennutzung als Mähwiesen degradierte Böden auf. Zudem entspricht die Wiederaufforstung mit einer Fichtenmonokultur nicht dem potentiellen Fichten-Tannen-Buchenmischwald (Abieti-Fagetum).

Für einen zweijährigen Exaktversuch wurde ein Altbestand in Viehberg (120 – 140 Jahre alter Bestand, seichtgründige Semipodsole bis Podsole) herangezogen. Dabei handelt es sich um einen Fichten-Kiefern-Mischwald im potentiellen Abieti-Fagetum, aus dem durch intensive (Streu)-Nutzung die Buche gänzlich verschwunden ist und die z. T. immissionsgeschädigte Tanne nur geringen Flächenanteil einnimmt.

Grundgestein sind auf allen Flächen saure Granite: in Bärenstein und Pflegerwiese Eisgarner Granit, im Trautwald Weinsberger Granit und in Viehberg Freistädter Granodiorit. Der pH-Wert (H_2O) im Oberboden liegt zwischen 3,8 und 4,2 (nach Ulrich, 1981 im Aluminium- bzw. Aluminium-Eisenpufferbereich). Detailierte Standortbeschreibungen (bodenkundlich, geologisch, klimatologisch) geben die FIW-Berichte (1988, 1992) und Katzensteiner et al. (1992).

Da die zoologischen Befunde im Rahmen verschiedener, meist übergeordneter Projekte erhoben wurden, erstrecken sich die Untersuchungen über mehrere Jahre und verschiedene Standorte. Die Intensität der Probenentnahme war je nach Fragestellung und Auftragssituation unterschiedlich, ebenso die systematische Ausarbeitung des Probenmaterials. Da ja „bloß" Reaktionscharakteristika der Mesofauna ermittelt werden sollten, wurde diese nur nach Großgruppen (Acari, Myriapoda, Protura, Collembola, Diptera-Larven und „Restliche") getrennt, die Collembolen aber noch auf Familienniveau ausgewertet. Abundanzzahlen, Dominanzspektren und Vertikalverteilung wurden ermittelt; Artbestimmungen bei Collembolen vorerst nur stichprobenartig durchgeführt.

Pro Standort und Termin wurden zur Erfassung der Mesofauna 4 – 10 Bodenbohrkerne (Durchmesser 4,8 cm; Tiefe: 10 cm) entnommen. Die Tiere wurden dann getrennt in zwei Tiefenstufen (0 – 5 cm, 5 – 10 cm) in einem modifizierten Berlese-Tullgren-Apparat extrahiert und in 70 % Alkohol konserviert.

Bei den Abundanzberechnungen wurden von allen Bohrkernen die Individuendichten pro Quadratmeter ermittel sowie die Mittelwerte, SE-Werte und prozentuellen Häufigkeiten der einzelnen Gruppen berechnet.

Die mehrjährigen Untersuchungen lassen somit für Populationsdynamik und Jahresmittelwerte (aus max. vier Probenterminen) einen Vergleich aufeinanderfolgender Jahre zu.

Bei der Düngung wurden mehrere Dünger-Varianten und -Kombinationen verwendet; in Schöneben: Biomag (2000 kg/ha; chemische Zusammensetzung: 10% Biosol, 80% Rohmagnesit, 10 % Kaustermagnesit) und die Kombination Biomag (2000 kg/ha) mit Bactosol (3000 kg/ha; chemische Zusammensetzung: 60% organische Substanzen aus bakterieller Biomasse, 4 – 6% organisch gebundener Stickstoff, 3 – 5% Phosphor als P_2O_5, 3 – 5% Kalium als K_2O, 1,5 – 2,5% Magnesium als MgO und 6 – 9% Kalzium als CaO). Biomag (= Handelsname) stammt von der Tiroler Magnesitwerken AG., Bactosol (= Handelsname) von der Biochemie Kundl Ges. m. b. H. Hinzu kommen Kontrollproben aus ungedüngten Arealen.

In Viehberg wurden innerhalb zweier Jahre (1991 und 1992) mehrere Varianten untersucht, wobei die Zusammensetzung der Düngergaben leicht modifiziert wurde: Biomag (2000 kg/ha; chemische Zusammensetzung: 70% Kaustermagnesit, 30% Rohmagnesit), Bactosol (2000 kg/ha; chemische Zusammensetzung: 50 – 75% organische Substanzen, 6 – 9% N organisch gebunden, < 5% P als P_2O_5, 2 – 5% K als K_2O). Vollkorn spezial 1000 kg/ha, chem.: 15:5:18 + 2,5 = $N:P_2O_5:K_2O$ + MgO + Spurenelemente), und die Kombinationen Biomag mit Bactosol (jeweils 2000 kg/ha, d. h. 4000 kg Dünger/ha) sowie Biomag (2000 kg/ha) mit Vollkorn (1000 kg/ha); dazu ungedüngte Kontrollproben.

In Schöneben wurde 1989 ein erstes faunistisches Reaktionsprofil erstellt und 1992 die „Langzeitwirkung" stichprobenartig überprüft. Zusätzlich wurde die Mikrofauna (Wimpertiere, Schalenamöben, Fadenwürmer, Rädertiere) innerhalb mehrerer aufeinanderfolgender Jahre untersucht (Glatzel et al. 1988, Ascht, Foissner 1992).

Parallel dazu wurde auch ein weiterer Standort in Schöneben (Bärenstein-Subplot = Trautwald) beprobt (1989, 1990, 1991, 1992), wo für eine andere Fragestellung eine massive und stark erhöhte Nitrammonkaldüngung (ca. 2500 Kalkammonsalpeter/ha; enthält 28% reinen Stickstoff, d. h. ca. 700 kg/ha/a) durchgeführt wurde.

Ergebnisse

1.a. Viehberg – Istzustand: Abundanz und Dominanz

Die untersuchten Viehbergstandorte weisen durch Waldweide (Name!), Streunutzung und Raubbau an der Buche extrem nährstoffarme Böden auf. Eine 10–15 cm dicke Rohhumusschicht bis Moderauflage (großteils Fichtennadeln) und „vergraste" Böden (*Calamagrostis villosa, Luzula sylvatica, Vaccinium myrtillus* und *Vaccinium vitis idaea*) sorgen dafür, daß auch die Bodenmesofauna ein für Fichtenwaldstandorte untypisches Bild zeigt.

Die Abundanzwerte liegen weit unter den durchschnittlich angegebenen Literatur-Werten (BRUCKER 1988, HÅGVAR 1982, PETERSSON, LUXTON 1982) bei rund 37000 Ind./m^2. Die pilzsaugenden Proturen – Indikatoren für den Vitalitätsgrad der Mykorrhiza (FUNKE 1986, 1987) – fehlen beinahe gänzlich (Tab. 1).

In den Viehbergstandorten dominieren die Milben mit 81% klar vor den Collembolen mit 11% (Tab. 1). Dies entspricht zwar dem Dominanzbild eines Fichtenforstes; doch indiziert das weit überdurchschnittliche Überwiegen der Milben die starke Versauerung dieser Rohhumusböden. Hier haben – offensichtlich auch ernährungsbedingt – die robusteren Milben einen Vorteil gegenüber den weichhäutigen und meist acidophoben Collembolen, die ja eher in schwach sauren bis basischen Mull- und Humusböden begünstigt sind.

1.b. Auswirkungen von Düngungsmaßnahmen

Während im ersten Untersuchungsjahr die meisten Düngervarianten, mit Ausnahme von Biomag, zu einer mehr oder weniger deutlichen Reduktion der Bodenmesofauna geführt haben, verringern sich in der zweiten Vegetationsperiode die Unterschiede zur Kontrollfläche oder werden gar aufgehoben (Tab. 1).

Die unmittelbare Abundanzreduktion nach einer Düngerapplikation trifft alle Gruppen, wobei die Milben besonders stark dezimiert werden; bei der Vollkorn-Variante wird ihre Abundanz praktisch halbiert. Die stärksten Abundanzeinbußen verursachen die Varianten Bactosol, Biomag mit Bactosol und Vollkorn. Weniger deutlich fällt die Reduktion bei Biomag mit Vollkorn aus. Hier wird der negative Effekt von Vollkorn durch die pH-stabilisierende Wirkung von Biomag offensichtlich hintangehalten (Tab. 1).

Die leichte Abundanzsteigerung bei Biomag wird im ersten Untersuchungsjahr durch deutliche Zunahme der Collembolen und leichte Zunahme bei Milben verursacht. Dieser positive Trend bleibt auch im Folgejahr aufrecht, wobei sich vor allem die Milben weiter steigern, die Proturen zunehmen und die Collembolen zumindest die selben Wohndichten wie bei der Kontrollfläche erreichen.

Im 2. Jahr nimmt auch die Wohndichte bei der Variante Biomag mit Bactosol gegenüber der Kontrollfläche zu. Bemerkenswert ist hierbei die Zunahme der Collembolen (Onychiuriden, Isotomiden, Tomoceriden) und wiederum der Proturen, deren Auftreten eine Verbesserung der Mykorrhiza-Pilzflora indiziert; sie kommen allerdings nur sehr inselartig, dort aber in hohen Zahlen vor. Allgemein ist aber witterungsbedingt die Wohndichte 1992 (erst relativ lange Schneelage im Untersuchungs-

Tabelle 1. Abundanzwerte (Ind./m^2) der Bodenmesofauna bei verschiedenen Düngerkombinationen in Viehberg (Kontr. = Kontrolle, BioBac = Biomag mit Bactosol, Bio-Voll = Biomag mit Vollkorn).

	Abundanz Ind./m^2 Jahresmittel 1991						Abundanz Ind./m^2 Jahresmittel 1992					
	Kontr.	Biomag	Bactosol	BioBac	Vollkorn	Bio-Voll	Kontr.	Biomag	Bactosol	BioBac	Vollkorn	Bio-Voll
Gesamt-Mesofauna	36846	43307	24399	24515	19328	36760	20967	24999	16298	24999	17115	16381
Acari	29922	31067	18165	17614	14048	31152	11841	15746	8022	11884	11344	11926
Myriapoda	170	255	212	170	255	212	85	127	85	170	127	212
Protura	535	1044	407	1086	195	365	509	891	42	3905	339	42
Collembola	4038	7443	4197	3591	2351	2764	6452	6452	7597	7809	4923	3819
Diptera-Larven	212	552	255	212	170	255	1570	255	85	127	85	0
Restliche	1969	2946	1163	1842	2309	2012	510	1528	467	1104	297	382
COLLEMBOLA												
Hypogastruridae	0	223	64	32	0	0	212	85	212	212	297	42
Neanuridae	503	1649	503	471	217	312	170	382	212	382	42	85
Tullbergiinae	13	331	76	140	13	77	255	42	0	297	297	0
Onychiurinae	1133	1324	1006	815	719	783	1783	1528	2080	1613	976	1401
Isotomidae	465	974	1356	1038	751	815	1104	637	1231	3098	1825	255
Entomobryidae	809	681	363	522	172	363	1104	891	594	721	722	212
Tomoceridae	796	1433	319	318	255	255	1358	1698	2334	1019	552	1273
Cyphoderidae	0	0	32	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Symphypleona	26	376	217	121	26	57	339	934	679	382	85	212
Neelipleona	293	452	261	134	198	102	127	255	255	85	127	339

gebiet, dann extrem heißer und trockener Sommer) auf allen Standorten gegenüber 1991 deutlich zurückgegangen.

Die Abundanzsteigerung bei der Düngerkombination Biomag mit Bactosol ist deshalb besonders bemerkenswert, weil ja im ersten Untersuchungsjahr noch eine Abundanzreduktion festzustellen war. Hier setzen positive Effekte offensichtlich erst später, und zwar deutlich im zweiten Untersuchungsjahr ein (Tab. 1).

Bei den anderen Düngervarianten zeigen sich weiterhin im Vergleich zur Nullfläche reduzierte Abundanzwerte. Die Differenz ist allerdings weniger deutlich ausgeprägt.

Somit ergibt sich nach zweijähriger Beobachtungzeit (Mittelwerte 1991/92), daß lediglich die Variante Biomag eine Abundanzsteigerung der Mesofauna auslöst (Abb. 1). Diese Wohndichtezunahme geht auf die Collembolen (Onychiurinae, Istomidae, Entomobryidae) und Proturen zurück.

2.a. Schöneben – Istzustand: Abundanz und Dominanz

Die „normalen" Abundanzverhältnisse auf den Schönebenstandorten gibt die Tabelle 2 wieder. Die Besiedelungsdichte ist hier deutlich höher als in Viehberg und kann generell gesehen als schwach unterdurchschnittlich betrachtet werden (PETERSON, LUXTON 1982, HÅGVAR1982). Milben und Collembolen nehmen je ca. 40% der Gesamtzönose ein (Tab. 2). Die älteren Bestände (Bärenstein und Bärenstein-Subplot = Trautwald) haben leicht höhere Besiedelungsdichten als der jüngere Bestand (Pflegerwiese), was vor allem auf die hohen Abundanzzahlen der Collembolen zurückgeht (Tab. 2, Tab. 3) und vermutlich durch den besseren Licht-(= Wärme)genuß im aufgelockerten Altbestand verursacht wird.

2.b. Auswirkungen von Düngungsmaßnahmen

Wie in Viehberg treten auch in Bärenstein im ersten Jahr Abundanzreduktionen und Dominanzverschiebungen auf (Tab. 2). Bei der Wiederbewertung im Jahr 1992 zeigt sich allerdings, daß die Düngerkombination Biomag mit Bactosol die relativ höchsten Besiedelungsdichten auslöst, bedingt durch die Collembolen (Isotomiden), die offensichtlich nach einer Düngung erst in den Folgejahren ihre Abundanz steigern; was naturgemäß auch zu einer gesteigerten Umsatzleistung führt (PERSSON 1983, 1989, VERHOEF, GOEDE 1985).

Im jungen Bestand der Pflegerwiese verursacht diese Düngerkombination (BioBac) schon im ersten Jahr einen leicht positiven Trend, der auf gesteigerte Abundanzzahlen bei Hypogastruriden und Isotomiden zurückgeht (Tab. 2).

Bei der Nitrammonkaldüngung (Bärenstein-Subplot = Trautwald) fällt die Abundanzreduktion im ersten Jahr besonders stark aus. Die Mesofauna erholt sich zwar schon im zweiten Jahr wieder (Verdoppelung gegenüber dem ersten Jahr; Tab. 3), bleibt aber über mehrere Jahre hinter der Nullfläche zurück. Eine 1992 stichprobenartig durchgeführte Erhebung zeigt, daß zwar noch Dominanzunterschiede auftreten, die Wohndichten aber auf Normal- und Düngefläche wieder nahezu gleich sind, bzw. daß die gedüngte Fläche sogar eine leicht erhöhte Abundanz aufweist (Tab. 3).

Tabelle 2. Abundanzwerte (Ind./m²) der Bodenmesofauna bei verschiedenen Düngerkombinationen in Schöneben (Kontr. = Kontrolle, BioBac = Biomag mit Bactosol).

	Bärenstein AVG (22. 08. 89; 21. 10. 89)			Pflegerwiese 22. 08. 89			Bärenstein 08. 07. 92		
	Kontr.	Biomag	BioBac	Kontr.	Biomag	BioBac	Kontr.	Biomag	BioBac
Gesamt-Mesofauna	44989	27763	25468	43544	42697	45157	19269	16372	28436
Acari	19269	16086	12308	20881	25210	19523	10101	8391	12223
Myriapoda	170	212	170	0	0	85	85	255	85
Protura	764	467	382	1528	340	1865	509	1358	2037
Collembola	20966	8875	11165	18334	16043	22496	7301	5349	11544
Diptera-Larven	255	255	170	679	85	0	0	0	85
Restliche	3565	1868	1273	2122	1019	1188	1273	1019	2462
COLLEMBOLA									
Hypogastruridae	5602	1571	1571	85	255	2377	85	255	85
Neanuridae	170	0	43	0	85	85	0	85	170
Tullbergiinae	424	213	43	170	0	340	340	255	255
Onychiurinae	4414	1316	1358	424	424	1019	1613	764	1188
Isotomidae	8658	4584	6324	16467	13751	17826	3735	2292	9167
Entomobryidae	85	467	1443	509	340	594	594	849	424
Tomocerida	764	425	43	679	1188	170	594	764	85
Cyphoderidae	0	128	0	0	0	0	0	0	0
Symphypleonae	0	43	255	0	0	0	85	0	85
Neelipleona	849	128	85	0	0	85	255	85	85

Tabelle 3. Abundanzwerte (Ind./m^2) der Bodenmesofauna bei Nitrammonkal-Düngung (N-gedüngt) im Bärenstein-Subplott.

	1989 Kontr.	1989 N-gedüngt	1990 Kontr.	1990 N-gedüngt	1991 Kontr.	1991 N-gedüngt	1992 Kontr.	1992 N-gedüngt
Gesamt-Mesofauna	53 161	23 111	48 355	39 030	45 554	24 717	11 396	14 322
Acari	31 704	15 343	34 219	30 908	32 405	10 743	6 366	8 212
Myriapoda	414	191	32	319	32	207	0	0
Protura	1 305	160	700	510	573	4 250	0	0
Collembola	17 350	5 985	12 448	6 020	10 188	7 973	4 393	4 773
Diptera-Larven	255	222	287	95	510	621	0	191
Restliche	2 133	1 210	669	1 178	1 846	923	637	1 146
COLLEMBOLA								
Hypogastruridae	1 051	223	414	573	4 679	844	64	318
Neanuridae	96	0	191	96	191	1 146	255	0
Tullbergiinae	637	127	2 069	605	1 178	860	891	700
Onychiurinae	1 114	191	955	319	796	2 404	573	509
Isotomidae	11 396	3 597	7 290	3 692	2 483	2 324	2 037	2 801
Entomobryidae	1 528	1 146	159	96	382	159	191	318
Tomoceridae	1 337	287	542	160	319	64	127	0
Cyphoderidae	0	0	32	0	0	16	0	0
Symphypleona	64	350	96	128	64	64	255	0
Neelipleona	127	64	700	351	96	92	0	127

Die sensitivste Gruppe bei Stickstoffdüngung sind die Collembolen, vor allem die Isotomiden und Onychiurinen. Auf den gedüngten Flächen verringern sich Abundanz (von 9931 Ind./m^2 auf 4648 Ind./m^2), Artenzahl und Diversität (von 1,76 auf 1,26). *Isotomiella minor* bleibt zwar die dominierende Collembolenart, ihre Wohndichte geht aber von rund 5000 Ind./m^2 auf 3000 Ind./m^2 zurück (Tab. 4).

Tabelle 4. Collembolenfauna im Bärenstein-Subplott (21. 10. 1989); Kontrollfläche und Nitrammonkal-Düngung.

	Abundanz Ind./m^2 Kontrolle	Dominanz %	Abundanz Ind./m^2 N-gedüngt	Dominanz %
NEANURIDAE				
Neanura muscorum	127	1,3	0	0,0
Friesea mirabilis	828	8,3	382	8,2
TULLBERGIINAE				
Mesaphorura juv.	509	5,1	191	4,1
ONYCHIURINAE				
Protaphorura armata	1146	11,5	127	2,7
ISOTOMIDAE				
Tetracanthella stachii	382	3,8	0	0,0
Folsomia quadrioculata	891	9,0	0	0,0
Isotomiella minor	4902	49,4	2992	64,4
Pseudisotoma sensibilis	191	1,9	0	0,0
Isotoma notabilis	446	4,5	0	0,0
TOMOCERIDAE				
Tomocerus minor	0	0,0	255	5,5
Tomocerus vulgaris	127	1,3	0	0,0
Tomocerus flavescens	318	3,2	255	5,5
NEELIPLEONA				
Megalothorax minimus	64	0,6	446	9,6
Abundanz	9931		4648	
Diversität	1,762		1,262	

Diskussion

Die im Zuge von Waldsanierungsversuchen durchgeführten Düngerapplikationen lösen nachhaltige ökologische Veränderungen aus. Neben den erwünschten Verbesserungen der Ernährungssituation und damit der Vitalität der Bäume sind negative

Begleiterscheinungen, wie NO_3^--Freisetzung in das Grund- und Trinkwasser, pH-Wert-Senkungen, Basenauswaschung, Störungen des Nährstoffkreislaufes, Ionenungleichgewichte (Kaupenjohann 1991) und Veränderung der Bodentier-Zönosen sorgfältig zu beobachten, um etwaige ökologische Risiken einer Düngung rechtzeitig erkennen zu können. Bei Düngungsmaßnahmen sollten nicht nur die unmittelbaren Veränderungen gegenüber der Ausgangssituation, sondern auch die ökologisch relevanteren „Begleiteffekte" mehrjähriger Voruntersuchungen erfaßt werden, bevor sie großflächig durchgeführt werden.

Die vorliegende zoologische Studie hat gezeigt, daß sich die Bodenmesofauna gut für die Indikation des Bodenzustandes und seiner Veränderung eignet. Langanhaltende Abundanzminderungen und Dominanzverschiebungen indizieren negative Düngefolgen; Abundanzsteigerungen, Zunahme der Artenzahl und Diversität hingegen belegen eine gelungene Melioration.

Die Zusammensetzung der Boden(meso)fauna, insbesondere der Collembolen, ermöglicht Rückschlüsse auf das Nahrungsangebot, auf die Umsatzleistung der Zönose, und auch auf die Belastung des Bodens durch Schadstoffe oder zu hohe Düngergaben (Hågvar 1982, Kopeszki 1992, Lohm et al. 1977). Je diverser die Bodenzönosen und je komplexer zusammengesetzt sie sind, um so größer ist die Dekompositionsleistung der Bodenfauna (Huhta et al. 1991, Kopeszki 1991, 1992b, Setälä, Haimi, Huhta 1988).

Wie eine Vorstudie in ehemals gedüngten Wäldern (die Applikation erfolgte vor ca. 15 Jahren) gezeigt hat, wird durch eine düngerbedingte Umwandlung von Rohhumusböden in Moderböden die Collembolenfauna stärker gefördert, während Milben in ihrer relativen Häufigkeit abnehmen. Als Folge von derartigen Waldsanierungsmaßnahmen treten bei der Mesofauna also deutliche Dominanzverschiebungen auf, die eine Umwandlung des Bodentyps indizieren (Ergebnisse aus dieser Vorstudie sollen in einem interdisziplinär gestalteten Artikel gesondert publiziert werden).

Aus zoologisch-produktionsbiologischer Sicht wäre das Idealziel einer Düngung die Erhöhung der Wohndichte der Bodenmesofauna, gepaart mit vergrößertem Artenspektrum zur Steigerung der Diversität und ökologischen Stabilität (Ghilarov 1980), weil durch Abundanz- und Diversitätszunahme die Dekomposition (Parker et al. 1984, Setälä et al. 1988) und in weiterer Folge die Mineralisation beschleunigt wird (Bååth et al. 1978, Behan 1978, Huhta et al. 1991, Lohm et al. 1977). Allerdings erscheint es für einen ökologisch positiven Langzeiteffekt auf die Mineralisationsprozesse entscheidend, daß die Abundanz der Mesofauna (Collembola) nicht nur geringfügig, sondern deutlich erhöht wird, damit es zu einer stärkeren „Beweidung" der Mikroflora und Pilze kommen kann (Ineson et al. 1982, Persson 1983, 1989, Peterson, Luxton 1982, Setälä et al. 1990, Sohlenius, Boström 1986). Zu geringe Abundanzzunahmen der Collembolen verursachen nämlich nur eine Stimulation des Bakterienwachstums, so daß die Nährsalze (in Rohhumus-Böden) noch stärker immobilisiert bleiben (Woods 1982).

Wie die Befunde belegen, lösen die meisten Düngemittel bei der Mesofauna einen „Düngerschock" aus, der durch Fertilitätseinbußen, Abundanzreduktion, Dominanzverschiebungen und geminderte Umsatzleistung gekennzeichnet ist. Hervorgerufen wird er durch die kurzfristigen, aber starken Veränderungen des Bodenchemismus, die zu einschneidenden Belastungen der betroffenen Organismen führen (Axelson et al. 1973, Bååth et al. 1978, Behan 1978, Trojanowski, Baluk 1989).

Diesem Düngerschock folgt im günstigsten Fall (bei Biomag und bei der Kombination Biomag mit Bactosol) schon nach einem Jahr ein Populationswachstum. Solche kurzfristigen Abundanzeinbußen, die sich später in gesteigerte Wohndichten umkehren, sind schon mehrfach in der Literatur belegt (Abrahamsen, Thompson 1979, Huhta et al. 1967, 1969, Lohm et al. 1977, Sohlenius, Boström 1986). In der vorliegenden Studie sind sie auf mehreren Standorten nachgewiesen worden. Vermutlich beruht das sekundäre Populationswachstum auf der langsamen und allgemeinen Verbesserung der Bodensituation (pH-Wert-Anhebung, qualitative und quantitative Verbesserung der Nahrungsressourcen, z. T. N-haltigere Nahrung durch zusätzliche Bodenvegetation) (Amelsvoort, Usher 1989, Bååth et al. 1978, Booth, Anderson 1979, Usher 1985).

Entscheidend für den Gesamteffekt ist dabei offensichtlich die jeweils applizierte Düngermenge (Dosiseffekt). Es ergibt sich, daß sie sorgfältig auf die jeweilige Ausgangssituation des Bodens abgestimmt werden muß (Abrahamsen, Thompson 1979, Lohm et al. 1977).

Neben der erwünschten Vitalitätsverbesserung für die Bäume kann somit eine richtig abgestimmte Dünger-Applikation auch die Bodenmesofauna hinsichtlich ihrer Abundanz und Umsatzleistung positiv beeinflussen, wobei aber nicht alle Gruppen gleich reagieren. Selbst innerhalb einer Familie können einzelne Arten unterschiedlich sensitiv sein. Das bedeutet, daß die Aussagekraft solcher Analysen erst in längerfristigen Untersuchungen und vor allem bei Artdetermination gesichert werden kann.

Auf Grund auch meiner Befunde erscheinen also nur die Düngemittel ökologisch unbedenklich, auf die die Mesofauna populationsdynamisch positiv reagiert (Biomag) oder nach deren Applikation sie sich relativ rasch wieder erholt, so daß sie ihre produktionsbiologischen Aufgaben im Gesamtökosystem Waldboden schnell wieder wahrnehmen kann, wie das bei Biomag mit Bactosol deutlich der Fall ist.

Kritisch zu beurteilen sind grundsätzlich zu hohe (Stickstoff)Dünger-Applikationen, vor allem für Böden, in welchen durch NO_3^--Mobilisierung und pH-Absenkungen die Bodenmesofauna in ihrer Reproduktion und Umsatzleistung so stark beeinträchtigt wird, daß sie sich Jahre lang nicht mehr erholen kann (wie z. B. beim Bärenstein-Subplot = Trautwald). In diesen Fällen kann die anfallende Streu nicht mehr genügend abgebaut werden, und es kommt u. U. zu Rohhumusbildung und Versauerung des Bodens. Hier können die Dünger den Bäumen zwar kurzfristige Verbesserungen bringen; dem Boden aber fügen sie langfristig Schaden zu, und damit ist der Schaden für das Gesamtökosystem sicher größer als der mögliche kurzzeitige forstwirtschaftliche Nutzen.

Zusammenfassung

Bei Düngeversuchen zur Waldsanierung hat eine bodenzoologische Begleitstudie ergeben, daß sich die Bodenmesofauna (vor allem die Collembolen) gut für eine Indikation des Bodenzustandes eignet. Düngerbedingte Veränderungen der Bodeneigenschaften spiegeln sich in geänderten Abundanz- und Dominanzwerten wider. Die meisten der hier angewendeten Düngemittel lösen erst einen „Düngerschock" aus (Abundanzabnahme, Arten- und Diversitätsreduktion), der sich aber in günstigen Fällen schon nach kurzer Zeit in einen positiven populationsdynamischen Trend umkehrt.

Entscheidend für eine produktive Gesamtverbesserung von Boden-Zönosen (gemessen an der Steigerung der Populationsdichte und der Umsatzleistung) sind Zusammensetzung und Menge der Düngemittel. Diese müssen auf die Ausgangssituation der zu behandelnden Böden abgestimmt werden. Im vorliegenden Fall ergaben die Varianten Biomag und Biomag mit Bactosol positive Effekte, während Vollkorn, Bactosol ohne pH-Stabilisierung und Nitrammonkal-Düngung zu negativen Folgen führten.

Danksagung

Die Studie wurde im Rahmen eines vom Forschungsfonds FWF geförderten Projektes (P 7096) und im Auftrag des Bundesministeriums für Wissenschaft und Forschung durchgeführt. Herrn Prof. SCHALLER danke ich sehr herzlich für die Projektleitung und kritische Durchsicht des Manuskripts, Herrn Dr. KATZENSTEINER für die Bereitstellung von fertig vorbereiteten Untersuchungsflächen und standortkundlichen Beschreibungen.

Literatur

ABRAHAMSEN, G. and W. N. THOMPSON: A long term study of the enchytraeid (Oligochaeta) fauna of a mixed coniferous forest and the effects of urea fertilization. – Oikos **32** (1979) 318–327.

AESCHT, E. und W. FOISSNER: Effects of mineral and organic fertilizers on the microfauna in a high-altitude reaforestation trial. – Biol. Fertil. Soils **13** (1992) 17–24.

AMELSVOORT, VAN P. A. M. and M. B. USHER: Egg production related to food quality in *Folsomia candida* (Collembola: Isotomidae): effects on life history strategies. – Pedobiologia **33** (1989) 61–66.

ANDERSON, J. M., P. INESON and S. A. HUISH: Nitrogen and cation mobilization by soil fauna feeding on leaf litter and soil organic matter from decidous woodland. – Soil Biol. Biochem. **15** (1983) 463–467.

AXELSSON, B., U. LOHM, H. LUNDKVIST, T. PERSSON, J. SKOGLUNG and A. WIREN: Effects of nitrogen fertilization on the abundance of soil fauna populations in a Scots pine stand. – Research Notes, Department of Forest Ecology and Forest Soils, Royal College of Forestry, Stockholm. **14** (1973) pp 18.

BÅÅTH, E., U. LOHM, B. LUNDGREN, T. ROSSWALL, B. SÖDERSTRÖM, B. SOHLENIUS and A. WIREN: The effects of nitrogen and carbon supply on the development of soil organsim populations and pine seedling; a microcosm experiment. – Oikos **31** (1978) 153–163.

BÅÅTH, E., U. LOHM, B. LUNDGREN, T. ROSWALL, B. SÖDERSTRÖM und B. SOHLENIUS: Impact of microbial-feeding animals on total soil activity and nitrogen dynamics; a soil microscosm experiment. – Oikos **37** (1981) 275–264.

BEHAN, H. K.: Effects of nitrogen fertilizers, as urea on Acarina and other arthropods in Quebec black spruce humus; – Pedobiologia **18** (1978) 249–263.

BOOTH, R. G. and J. M. ANDERSON: The influence of fungal food quality on the growth and fecundity of *Folsomia candida* (Collembola: Isotomidae). – Oecologia (Berl.) **38** (1979) 317–323.

BRUCKER, G.: Lebensraum Boden. Kosmos Handbuch, Franckh'sche Verlagshandlung, Stuttgart (1988) pp 100.

CROSSLEY, D. A. und M. WITTKAMP: The role of arthropods and microflora in breakdown of white oak litter. – Pedobiologia **6** (1966) 293–303.

DUNGER, W.: Tiere des Bodens als Leitformen für anthropogene Umweltveränderungen. – Dechenia Beihefte, Bonn **26** (1982) 151–157.

FIW: Österreichische Forschungsinitative gegen das Waldsterben, Hrsg. FÜHRER, E. und F. NEUHUBER im Auftrag des BMfWF. 1987–1992.

FUNKE, W.: Tiergesellschaften im Ökosystem „Fichtenforst" (Protozoa, Metazoa – Invertebrata) – Indikatoren tiefgreifender Veränderungen in Waldökosystemen. (1986) KfK-PEF **9**.

–: Wirbellose Tiere als Indikatoren in Wäldern. VDI-Berichte **609** (1987) 133–176.

GHILAROV, M. S.: Bodenwirbellose als Indikatoren des Bodenhaushaltes und von bodenbildenden Prozessen. – Pedobiologia **18** (1978) 300–309.

–: Bodenwirbellose als Bioindikatoren des Bodenhaushaltes und seiner Änderungen unter anthropogenen Einflüssen. – Z. Bioindikation **1** (1980) 3–9.

GLATZEL, G., K. KATZENSTEINER, H. STEBRA, K. HASSELWANDTER, M. BERRECK, W. FOISSNER und E. AESCHT: Waldsanierungsversuche Schöneben. Im Auftrag der Biochemie Kundl (1988) pp. 36.

HÅGVAR, S.: Collembolan in Norwegian coniferous forest soils. I. Relations to plant communities and soil fertility. – Pedobiologia **24** (1982) 255–258.

HERLITZIUS, H.: Decomposition in five woodland soils: relationships with some invertebrate populations and with weather. – Biol. Fertil. Soils **3** (1987) 85–89.

HUHTA, V., E. KARPINEN, M. NURMINEN and A. VALPAS: Effects of silvicultural practices upon arthropod, annelid and nematode populations in coniferous forest soil. – Ann. Zool. Fenn. **4** (1967) 87–143.

HUHTA, V., M. NURMINEN and A. VALPAS: Further notes on the effect of silvicultural practices upon the fauna of coniferous forest soil. – Ann. Zool. Fenn. **6** (1969) 327–334.

HUHTA, V., J. HAIMI and B. SETÄLÄ: Role of the soil fauna in soil processes: techniques using simulated forest flor. – Agriculture, Ecosystem and Environment **34** (1991) 223–229.

INESON, P., A. LEONARD und J. M. ANDERSON: Effects of collembolan grazing upon nitrogen and cation leaching from decomposing leaf litter. – Soil Biol. Biochem. **14** (1982) 605–610.

ISERMANN, K.: Ammoniakemissionen der Landwirtschaft als Beitrag ihrer Stoffbilanz und Lösungsansätze zur Minderung VDI-Bericht, KTBL (Hrsg.) „Ammoniak in der Umwelt" (1990) **1**, 1–23.

KATZENSTEINER, K., G. GLATZEL, M. KAZDA and H. STEBRA: Effects of air pollutants on mineral nutrition of norway spruce and revitalization of declining stands in Austria. Water, Air and Soil Pollution **61** (1992) 309–322.

KATZENSTEINER, K., G. GLATZEL and M. KAZDA: Nitrogen-induced nutritional imbalances – a factor to Norway spruce decline in the Bohemian Forest (Austria). – Forest Ecology and Management **51** (1992) 29–42.

KAUPENJOHANN, M.: Auswirkungen von Ammoniakeinträgen am Beispiel eines Kiefernstandortes. VDI-Bericht, KTBL (Hrsg.) „Ammoniak in der Umwelt" (1990) **12**, 1–13.

KAZDA, M.: Zusammenhang zwischen Stoffeintrag, Bodenwasserchemismus und Baumernährung in drei Waldökosystemen im Böhmerwald, Oberösterreich. – Manuskript für die Forstliche Schriftenreihe der Univ. f. Bodenkultur, Wien (1989) pp. 138.

KOPESZKI, H.: Populationsdynamik und Indikatorwert der Boden-Mesofauna im Einflußbereich des sauren Buchen-Stammablaufes. – Zool. Anz. **221** (1988) 368–378.

–: Abundanz und Abbauleistung der Mesofauna (Collembolen) als Kriterien für die Bodenzustandsdiagnose im Wiener Buchenwald. – Zool. Anz. **227** (1991) 136–159.

–: Veränderungen der Mesofauna eines Buchenwaldes bei Säurebelastung. – Pedobiologia **36** (1992a) 295–305.

–: Versuch einer aktiven Bioindikation mit den bodenlebenden Collembolen-Arten *Folsomia candida* (Willem) und *Heteromurus nitidus* (Templeton) in einem Buchenwald-Ökosystem. – Zool. Anz. **228** (1992b) 82–90.

LOHM, U., H. LUNDKVIST, T. PERSSON and A. WIREN: Effects of nitrogen fertilization on the abundance of enchytraeids and microarthropods in Scots pine forests. – Studia forestalia suecica **140** (1977) 1–23.

PARKER, L. W., P. F. SANTOS, J. PHILLIPS and W. G. WHITFORD: Carbon and nitrogen dynamics during decomposition of leaf litter and roots of a Chihuahuan desert annual, *Lepedium lasiocarpum*. – Ecol. Monogr. **54** (1984) 3, 339–360.

PERSSON, T.: Influence of soil animals on nitrogen mineralisation in a northern Scots pine forest. In LEBRUN, P. et G. WAUTHY (ed.) New trends in Soil Biology (1983) 117–126.

–: Role of soil animals in C and N mineralization. – Plant and Soil **115** (1989) 241–245.

PETERSEN, H. and M. LUXTON: A comperative analysis of soil fauna populations and their role in decomposition processes. – Oikos **39** (1982) 286–387.

SANTOS, F. P. and W. G. WHITFORD: The effects of microarthropods on litter decomposition in a Chihuahuan desert ecosystem. – Ecology **62** (1981) 654–663.

SCHUBERT, R.: Bioindikation in terrestrischen Ökosystemen. Gustav Fischer Verlag, Jena 1991.

SEASTEDT, T. R.: The role of microarthropods in decomposition and mineralization processes. – Ann. Rev. Entomol. **29** (1984) 25–46.

SETÄLÄ, H., J. HAIMI and V. HUHTA: A microcosm study on the respiration and weight loss in birch litter and raw humus as influenced by soil fauna. – Biol. Fertil. Soils **5** (1988) 282–287.

SETÄLÄ, H., M. TYYNISMAA, E. MARTIKAINEN and V. HUHTA: Mineralization of N and P in relation to decomposer community stucture in coniferous forest soil. – Pedobiologia **35** (1991) 285–296.

TROJANOWSKI, H. und A. BALUK: Einfluß der Stickstoffdüngung auf die kleinen wirbellosen Bodentier-Acarina und Collembolen. – **5**. Int. Conf. Bioindicatores (1989) 122–125.

USHER, M. B.: Population community dynamics in the soil ecosystems. In FITTER, A. H., D. ATKINSON, D. J. READ and M. H. USHER (ed.) Ecological interactions in soil: Plants, Microbes and Animals. Blackwell Scientific publications (1985) 243–266.

ULRICH, B.: Ökologische Gruppierungen von Böden nach ihrem chemischen Bodenzustand. Z. Pflanzenernähr. u. Bodenkunde **144** (1981) 289–305.

VERHOEF, H. A. and R. G. M. GOEDE: Effects of collembolan grazing on nitrogen dynamics in a coniferous forest. In A. H. FITTER (ed.) Blackwell Scientific publications. (1983) 367–376.

WOODS, L. E., C. V. COLE, E. T. ELLIOT, R. V. ANDERSON and D. C. COLEMAN: Nitrogen transformations in soil as affected by bacterial-microfaunal interactions. – Soil. Biol. Biochem. **14** (1982) 93–98.

ZECH, W. und E. POPP: Magnesiummangel, einer der Gründe für das Fichten- und Tannensterben in NO-Bayern. – Forstw. Cbl. **102** (1983) 50–55.

ZÖTTL, H. W. und R. F. HÜTTL: Nutrient supply and forest decline in South-west-Germany. – Water, Air, and Soil Pollution **31** (1985) 449–462.

Anschrift des Verfassers: H. KOPESZKI, Institut für Zoologie der Universität
Althanstr. 14, A-1090 Wien